

О ТЕПЛОМ РЕЖИМЕ ПАРОФАЗНО ГОРЯЩЕЙ ЧАСТИЦЫ МАГНИЯ

И. С. Альтман, Я. И. Вовчук

Институт горения Одесского государственного университета, 270026 Одесса, Украина

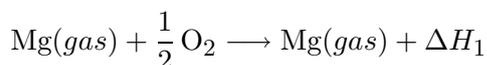
На основании анализа соотношения тепловых потоков при горении одиночной частицы магния в кислородсодержащей среде показано, что парофазное горение возможно лишь в случае конденсации заметной части оксида на поверхности капли.

При парофазном горении магния конденсированные продукты наряду с субмикронной фракцией содержат и значительную часть крупных частиц оксида [1–4]. Близость дисперсности крупных частиц к дисперсности исходных частиц металла свидетельствует о накоплении оксида на поверхности частиц магния в процессе горения. Поскольку кислород не поступает к поверхности парофазно горящей частицы металла, находящейся при температуре, близкой к температуре кипения, то конденсированный оксид на поверхности не может образовываться посредством гетерогенной реакции окисления. В этом случае накопление оксида возможно или в результате переноса и осаждения на горящей капле субмикронного оксида, образующегося в зоне конденсации [5], или за счет конденсации газообразного оксида на поверхности частицы металла.

В настоящей работе показано, что парофазное горение одиночной частицы магния в кислородсодержащей среде возможно лишь в том случае, когда заметная часть оксида конденсируется на поверхности капли в процессе горения.

При проведении оценок использованы взятые из эксперимента [6] значения температур капли $T_p = 1400$ К и зоны реакции $T_b = 2600$ К при температуре среды $T_\infty = 300$ К.

Максимальное количество тепла (Q_b), поступающего в каплю магния при ее горении, можно оценить как разность между максимальным тепловыделением и теплоотводом в окружающую среду. Источником тепловыделения при горении магния являются следующие брутто-реакции:



где $\Delta H_1 = 39,4$ ккал/моль и $\Delta H_2 = 132,4$ ккал/моль [7] при температуре горения. Таким образом, $Q_b = \Delta H_1 + \Delta H_2 = 171,8$ ккал/моль.

Потери энергии при горении обусловлены теплопроводностью и излучением. Конвективный поток от зоны реакции горящей частицы магния определяется по формуле

$$Q = \alpha(T_b - T_\infty)S,$$

где α — коэффициент теплообмена между зоной реакции и средой, S — площадь поверхности зоны реакции. Поток кислорода к зоне реакции запишем в виде

$$J = \beta \frac{p}{RT} C_\infty S,$$

где β — коэффициент массообмена между средой и зоной реакции, C_∞ — мольная доля кислорода в среде, p — давление, R — газовая постоянная.

Разделив конвективный поток на поток кислорода с учетом известных выражений для α и β [8] и приняв число Льюиса равным единице, получим конвективные теплотери в расчете на моль реагирующего кислорода:

$$Q'_c = \frac{Q}{J} = \frac{c_p(T_b - T_\infty)}{C_\infty},$$

где c_p — молярная теплоемкость газа. С учетом стехиометрии конвективные теплотери в расчете на моль реагирующего магния составляют

$$Q_c = \frac{Q'_c}{2} = \frac{c_p(T_b - T_\infty)}{2C_\infty}.$$

Оценим радиационный теплообмен. Как и в [9], будем полагать, что отвод тепла, выделяющегося при конденсационном росте субмикронных частиц окиси, за счет теплопроводности невозможен, и вся энергия конденсации ΔH_2 «сбрасывается» частицами оксида

за счет излучения. Действительно, как показано в [10], в случае, если так называемый коэффициент аккомодации энергии [11] не превышает $5 \cdot 10^{-3}$, излучение играет ведущую роль в отводе теплоты конденсации. Учитывая полученную в [12] верхнюю оценку значения этого коэффициента при температурах горения ($< 1,7 \cdot 10^{-3}$), следует ожидать, что энергия конденсационного роста субмикронного оксида излучается и не влияет на разогрев газа.

Поскольку излучающая зона является оптически тонкой [6], а излучатели — это отдельные субмикронные частицы оксида, доля излученной энергии, попадающая на частицу металла, определяется телесным углом Ω , под которым частица металла видна из излучающей частицы оксида. Введя величину $\gamma = \Omega/(4\pi)$ — долю излучения, попадающего на частицу магния, запишем энергию, уносимую излучением в окружающее пространство при образовании одного моля субмикронного оксида:

$$Q_r = (1 - \gamma)\Delta H_2.$$

Несложный расчет дает:

$$\gamma = \frac{1}{2} [1 - (1 - (r_p/r_c))^{1/2}],$$

где r_p — радиус частицы металла, r_c — радиальная координата излучающей частицы оксида.

Эксперимент [6] показал, что при горении частицы магния излучение сплошного спектра исходит из сферического слоя радиусом $2r_p$ и толщиной $\approx 0,2r_p$. В нашем случае это позволяет получить оценку снизу: $r_c/r_p > 1,6$, чему соответствует $\gamma < 0,1$. Следовательно, в окружающее пространство излучением уносится энергия $Q_r > 0,9\Delta H_2 = 119,2$ ккал/моль.

Если бы продукты горения магния конденсировались только в объеме, образуя частицы субмикронных размеров, то на каплю металла в расчете на моль реагирующего магния попало бы количество теплоты $Q_+ = Q_b - (Q_c + Q_r)$. Для $C_\infty = 0,21$, $c_p = 7$ ккал/(моль · К) получим $Q_+ < 14,3$ ккал/моль. Это значение значительно меньше количества теплоты $Q_- = 36,6$ ккал/моль, необходимого для испарения моля магния ($\Delta H_V = 30,6$ ккал/моль при $T = 1400$ К) и нагрева его от температуры капли до температуры в зоне горения.

Таким образом, если бы конденсация происходила только в объеме, то парофазное горение магния было бы невозможно из-за больших потерь тепла. Следовательно, для осуществле-

ния стационарного режима парофазного горения необходимо, чтобы часть газообразного оксида конденсировалась на поверхности частицы магния. Оценим необходимую для поддержания парофазного горения долю оксида η , конденсирующегося на поверхности частицы магния. Пренебрегая излучением капли металла и учитывая, что радиационные потери от субмикронного оксида уменьшаются на величину, определяемую долей η , запишем уравнение теплового баланса:

$$Q_- = Q_b + \eta Q_0 - [Q_c + (1 - \gamma)(1 - \eta)\Delta H_2]. \quad (1)$$

Слагаемое ηQ_0 учитывает, что температура оксида, сконденсировавшегося на поверхности капли, равна T_p (здесь $Q_0 = 16,1$ ккал/моль — теплота охлаждения конденсированной окиси от 2600 до 1400 К). Из (1) находим

$$\eta = \frac{Q_- + Q_c - Q_b + (1 - \gamma)\Delta H_2}{(1 - \gamma)\Delta H_2 + Q_0}. \quad (2)$$

Учет излучения капли металла приводит к увеличению доли оксида, конденсирующегося на поверхности частицы магния, менее чем на 5% по сравнению с (2), даже для частиц радиусом 1 мм. При этом поправка уменьшается с уменьшением размера частиц.

Легко заметить, что η слабо зависит от доли излучения, попадающего на частицу магния, при реализующихся в процессе горения значениях γ . Из (2) находим, что для поддержания стационарного парофазного горения необходима доля $\eta = 0,16$ при $\gamma = 0,1$ ($r_c/r_p = 1,6$); $\eta = 0,23$ при $\gamma = 0,01$ ($r_c/r_p = 5$). Оценка доли оксида, конденсирующегося на поверхности парофазно горящей частицы магния, хорошо согласуется со значением, экспериментально наблюдаемым в [1–4]. По-видимому, перенос субмикронного оксида на поверхность горячей капли не играет значительной роли в образовании крупного оксидного остатка.

В квазистационарных [13–15] и нестационарных моделях [16], описывающих парофазное горение магния, принимается, что основным источником, обеспечивающим испарение магния и поддержание горения, является тепло, выделяющееся в зоне реакции, а вопрос об образовании крупного остатка оксида несуществен. В то же время, проведенные в данной работе оценки показывают, что основным тепловым источником является тепло, выделяющееся при конденсации газообразного оксида на поверхности частицы магния. Это обстоятельство, на наш взгляд, должно быть учтено при

создании физически более адекватных моделей горения легкокипящих металлических частиц.

Работа выполнена при поддержке INTAS (грант 96-2334).

ЛИТЕРАТУРА

1. Гусаченко Е. И., Стесик Л. Н., Фурсов В. П., Шевцов В. И. Исследование конденсированных продуктов горения магниевых порошков. I. Зависимость от давления // Физика горения и взрыва. 1974. Т. 10, № 4. С. 548–554.
2. Гусаченко Е. И., Стесик Л. Н., Фурсов В. П., Шевцов В. И. Исследование конденсированных продуктов горения магниевых порошков. II. Зависимость от размеров частиц // Физика горения и взрыва. 1974. Т. 10, № 5. С. 669–676.
3. Деревяга М. Е., Стесик Л. Н., Федорин Э. А. Режимы горения магния // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14, № 5. С. 3–10.
4. Shoshin Yu. L., Altman I. S. Experimental study of radiation heat losses during single magnesium particle combustion // 27th Sympos. (Intern.) on Combustion, Boulder, USA, August 1998: Book of Abstracts. P. 256.
5. Флорко А. В., Козицкий С. В., Золотко А. Н., Головкин В. В. О механизме переноса конденсированных продуктов сгорания на поверхность горячей частицы магния // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 6. С. 24–29.
6. Флорко А. В., Золотко А. Н., Каминская Н. В., Шевчук В. Г. Спектральные исследования горения частиц магния // Физика горения и взрыва. 1982. Т. 18, № 1. С. 17–22.
7. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справочник / Под ред. В. П. Глушко. М.: Изд-во АН СССР, 1962.
8. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1987.
9. Альтман И. С. О теплообмене при конденсации продуктов газофазного горения металлов // Физика горения и взрыва. 1998. Т. 34, № 4. С. 49–51.
10. Крестинин А. В., Кузнецов В. А. Модель гомогенной конденсации окиси магния в разбавленном диффузионном пламени // Хим. физика. 1986. Т. 5, № 3. С. 403–411.
11. Гудман Ф., Вахман Г. Динамика рассеяния газа поверхностью. М.: Мир, 1980.
12. Altman I. S. On heat transfer between nanoparticles and gas at high temperatures // J. Aerosol Sci. 1999. V. 30, suppl. N 1. P. S423–S424.
13. Бржустовский Т., Глассмен И. Парофазные диффузионные пламена при горении магния и алюминия. I. Аналитическое исследование // Гетерогенное горение. М.: Мир, 1967. С. 91–125.
14. Клячко Л. А. Горение неподвижной частицы легкокипящего металла // Физика горения и взрыва. 1969. Т. 5, № 3. С. 404–412.
15. Гуревич М. А., Озерова Г. Е., Степанов А. М. Расчет скорости горения металлической частицы с учетом конденсации окисла // Горение и взрыв. М.: Наука, 1972. С. 175–181.
16. Лукин А. Я., Степанов А. М. Расчет дисперсности продуктов сгорания металлической частицы // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 3. С. 41–50.

*Поступила в редакцию 3/IV 1997 г.,
в окончательном варианте — 8/VII 1999 г.*